

酸素脈を用いた最大運動時の心拍出量の推定

大森 圭・古川 順光・吉野 直美・宮下 智
内田 勝雄・丹羽 健市*

Estimation of the Cardiac Output at Exhaustion from Oxygen Pulse

Kei OMORI, Yorimitsu FURUKAWA, Naomi YOSHINO, Satoshi MIYASHITA
Katsuo UCHIDA, Ken-ichi NIWA*

Abstract : Cardiac output (\dot{Q}) was measured for young elite cross-country skiing racers in Yamagata Prefecture by a rebreathing method. Stepwise exercise using a treadmill was continued to exhaustion. Measurement of the correct \dot{Q} at exhaustion is difficult because the rebreathing method required 10 to 20 seconds to measure \dot{Q} . We plotted \dot{Q} measured at sub-maximal exercise vs. the corresponding work load, and estimated \dot{Q} at exhaustion by extrapolating the relation to the load at exhaustion. The measured \dot{Q} just after exhaustion was about 30% of the extrapolated \dot{Q} . Oxygen pulse (= oxygen uptake / heart rate) was analyzed to estimate stroke volume at exhaustion. \dot{Q} at exhaustion was calculated as the product of the stroke volume and heart rate measured at exhaustion. The extrapolated \dot{Q} was about 60% of thus estimated \dot{Q} . The measured and extrapolated \dot{Q} were significantly smaller than the estimated \dot{Q} from the oxygen pulse. Since the oxygen uptake and heart rate can be measured even at exhaustion, the estimated \dot{Q} is likely to reflect the true \dot{Q} at exhaustion.

Key words : cardiac output, exhaustion, oxygen pulse, rebreathing method

はじめに

測定機器の進歩により、種々の循環器系パラメータの非観血的測定が可能になり、医学的検査やスポーツ選手の体力測定、理学療法評価などに広く活用されている。循環器系パラメータの中でも心拍出量 (\dot{Q}) は、呼吸系の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と並んで運動能力を評価するためのもっとも主要な因子である。特に最大運動時 (all-out 時) の \dot{Q} を知ることは、循環器系機能を評価し適切な運動

処方を行なう上で不可欠である。運動時の \dot{Q} の測定は通常非観血的に行われる。非観血的 \dot{Q} 測定は、一般に再呼吸法¹⁻²⁾で行われるが、この方法は1回の測定に10~20秒の時間を要するので最大運動直後の \dot{Q} を得ることが困難である。すなわち、この10~20秒間にも最大運動からの回復が進み、 \dot{Q} が低く評価されるという問題点があった。

今回我々は、アセチレン再呼吸法³⁾による非観血的 \dot{Q} 測定によって、最大運動直後(運動停止後)に \dot{Q} (以下、実測値 \dot{Q}) の測定を行った。また、最大運動以下の運動定常状態(運動中)に同法により測定した \dot{Q} と運動強度との回帰式から最大運動強度に補外した \dot{Q} (以下、補外値 \dot{Q}) を求めた。さらに、最大運動に達するまでの $\dot{V}O_2$ と心拍数(HR)から求めた酸素脈を解析することにより推

山形県立保健医療短期大学理学療法学科
* 山形大学教育学部保健体育学科
Department of Physical Therapy, Yamagata School of Health Science
* Department of Physical Education, Faculty of Education, Yamagata University

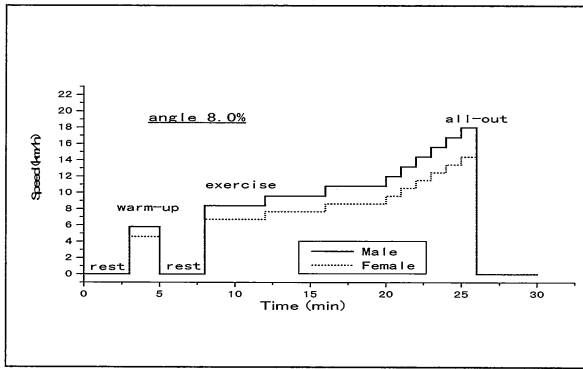


Fig. 1 最大酸素摂取量測定プロトロール

定した最大運動時の \dot{Q} (以下, 推定値 \dot{Q}) を計算した。これら 3 種の \dot{Q} を比較検討し, 最大運動時の真の \dot{Q} を得る方法について考察した。

方 法

1. 対 象

対象は, 山形県スキー連盟が指定したクロスカントリースキー・ジュニア強化選手, 男子 7 名 (15.7 ± 2.0 歳) および女子 10 名 (15.3 ± 2.2 歳) の計 17 名であった。

2. 運動負荷

トレッドミル (ミナト医科学社製トレッドミル, AR-160A) による漸増運動負荷を行った。Fig.1 に実験プロトコルを示す。被験者は, まず立位で 3 分間安静を保った後, 5.8km/h の速度でウォーミング・アップを行い, さらに 3 分間の安静を保ち, その後に漸増運動負荷を開始した。トレッドミルの走行速度は, 8.4km/h, 9.6km/h, 10.8km/h をそれぞれ 4 分間行い, その後は 1 分ごとに 1.2km/h ずつ, 被験者が最大運動に達するまで漸増させた。漸増運動負荷中トレッドミルの走行面傾斜は 8% に設定した。なお, 女子の走行速度は上記の 80% とした。

各被験者には測定の方法, 測定による危険, 期待される結果を十分に説明し, 実験に参加する承諾を得た上で測定を行った。また, 測定による危険を回避する目的で, 胸部双極誘導による心電図 (バイオビュー 1000A, NEC) および血圧 (EBP300, ミナト医科学) をモニターし, 被験者の状態把握に努めた。

3. 測定項目および測定機器

- (1) \dot{Q} : アセチレン・アルゴン再呼吸法で測定した (レスピロモニタ RM-300I, ミナト医科学, RL-600, WESTRON)
- (2) HR: 心電図の R-R 間隔から心拍数を求めた (バイオビュー 1000A, NEC)。
- (3) 1 回換気量 (TV), 分時換気量 ($\dot{V}E$): 呼気流量計で breath-by-breath の呼出量を測定し, これを TV とした。TV に呼吸数を掛けて $\dot{V}E$ を求めた (レスピロモニタ RM-300I, ミナト医科学)。
- (4) $\dot{V}O_2$: 質量分析計 (RL-600, WESTRON) で呼気酸素濃度を測定し, 上記 $\dot{V}E$ を用いて $\dot{V}O_2$ を計算した。

\dot{Q} の実測は, ウォーミングアップ前安静時, 最大下運動 (運動開始後 4 分, 8 分, 12 分経過時の運動定常状態) および最大運動直後に測定した。最大下運動での \dot{Q} は, トレッドミルのスピードを変えて 3 分経過後に運動の定常状態に入ったことを $\dot{V}O_2$ がほぼ一定になったことで確認してから測定した。

酸素脈による \dot{Q} の推定は以下のように行った⁴⁾。

$$\begin{aligned} \text{酸素脈} &= \dot{V}O_2 / HR \\ &= (CaO_2 - CvO_2) \times SV \\ &= CaO_2 \times SV - CvO_2 \times \dot{Q} / HR \quad \text{①} \end{aligned}$$

ここで, CaO_2 は動脈血の酸素含量でヘモグロビン濃度に依存する。今回の実験では被験者のヘモグロビン濃度を男女とも 15 g/dl と仮定して, CaO_2 を約 20 vol% = 0.2 とした。激運動時には大量の発汗により血中ヘモグロビン濃度が軽度増加することが知られているが, この影響は小さいので本研究では, CaO_2 は運動時も一定と仮定した。 CvO_2 は混合静脈血の酸素含量, SV は 1 回拍出量である。 CvO_2 は運動により低下し, \dot{Q} は増加するので, 両者の積 $CvO_2 \times Q$ は, ほぼ一定と近似できる⁵⁾。また, 運動強度の増大により SV , HR と共に増加するが SV の方が早く一定値に飽和し, HR は all-out まで直線的に増加することが知られている。 SV が飽和するのは, 最大酸素摂取量の約 40%, HR 約 100 beats/min の運動強度のときとされている⁶⁾。そこで一定値に達した SV を SV_{max} と書くと, ①は以下のように書き直せる。

$$\text{酸素脈} = 0.2SV_{max} - \text{Const.} / HR \quad \text{②}$$

そこで本研究では, 安静時および HR 120

Table 1 1/HRに対する酸素脈の回帰式

男子	切片	勾配	R ²	SV(ml)
1	40.6	-2954	0.82	203
2	32.5	-2658	0.95	163
3	35.4	-2256	0.96	177
4	39.3	-2886	0.82	196
5	25.8	-1901	0.94	129
6	45.1	-4337	0.76	225
7	34.4	-2254	0.82	172
女子	切片	勾配	R ²	SV(ml)
1	30.0	-2836	0.69	155
2	27.7	-2323	0.83	138
3	16.5	-1373	0.92	82.6
4	18.6	-1945	0.87	92.9
5	23.8	-1674	0.85	119
6	20.0	-1588	0.92	104
7	26.4	-2626	0.89	132
8	27.6	-2504	0.89	138
9	28.8	-2201	0.89	144
10	25.0	-1884	0.89	125

Table 2 最大運動時の心拍出量 (L/min)

男子	実測値	補外値	推定値	女子	実測値	補外値	推定値
1	8.49	16.7	32.7	1	4.85	15.2	25.0
2	7.98	17.5	32.2	2	7.51	11.4	24.2
3	11.8	21.7	33.1	3	5.33	8.64	15.8
4	12.3	21.5	27.7	4	4.76	7.69	18.4
5	6.90	13.0	26.2	5	9.38	14.3	19.5
6	7.73	17.5	41.2	6	4.40	11.4	20.5
7	5.33	23.4	26.8	7	6.55	8.29	23.0
平均値	8.64	18.4	31.4	8	6.75	11.0	23.8
標準偏差	2.52	3.92	5.22	9	6.10	13.5	27.4
				10	8.81	18.0	22.7
				平均値	6.44	12.0	22.0
				標準偏差	1.71	3.32	3.45

beats/min 以下の軽度運動時を除いたデータについて、横軸 1/HR、縦軸酸素脈のプロットを行ない、得られた回帰直線の切片から 1/HR=0(最大運動時に相当) のとき酸素脈を求めた。次に

$$SV_{\max} = (1/HR=0 \text{ の時の酸素脈}) / 0.2 \quad (3)$$

として最大運動時の SV_{max} (ml) を算出した。

この SV_{max} と最大運動時に測定した HR (HR_{max}) との積から推定値 \dot{Q} (L/min) が次式のように求められる。

$$\dot{Q} = SV_{\max} \times HR_{\max} / 1000 \quad (4)$$

結 果

\dot{Q} の実測値、補外値および推定値について男女別に比較検討した。

最大下運動の運動定常状態で測定した \dot{Q} のトレッドミルスピードに対するプロットを Fig.2 に示す。得られた回帰直線を all-out 時の運動強度に

補外して補外値 \dot{Q} を求めた。1/HR に対する酸素脈のプロットの例を Fig.3 に示す。各被験者毎の回帰式の係数および決定係数 (R²) を Table.1 に示す。個々の被験者について、実測値 \dot{Q} 、補外値 \dot{Q} および推定値 \dot{Q} を男女別にまとめたものを Table.2 に示す。

1. 男子の \dot{Q} (L/min) の平均値±標準偏差は、実測値 8.64 ± 2.52, 補外値 18.4 ± 3.92, 推定値 31.4 ± 5.22 であった。また、推定値を 100%とした場合、実測値は 27.9 ± 9.03%であり、補外値は 59.9 ± 7.25%であった。
2. 女子の \dot{Q} (L/min) の平均値±標準偏差は、実測値 6.44 ± 1.71, 補外値 12.0 ± 3.32, 推定値 22.0 ± 3.45 であった。また、推定値を 100%とした場合、実測値は 29.8 ± 8.72%であり、補外値は 54.5 ± 13.6%であった。

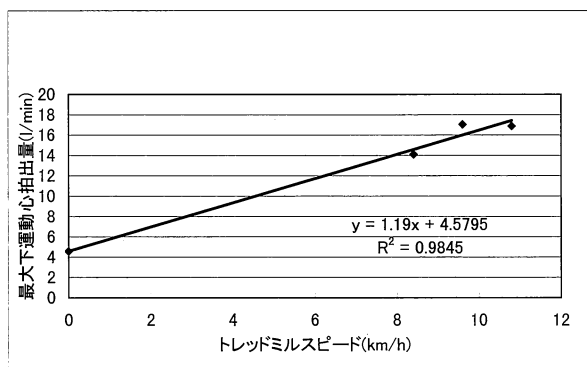


Fig. 2 最大下運動心拍数とトレッドミルスピードのプロット例

3. 補外値と実測値との比較では, 補外値を 100% とした場合実測値は男子 $48.0 \pm 11.8\%$, 女子 $56.0 \pm 14.4\%$ であった。

考 察

今回我々は最大運動到達直後の \dot{Q} を実測し, それを推定値 \dot{Q} および補外値 \dot{Q} と比較した。結果として実測値 \dot{Q} は, 男子で推定値 \dot{Q} の約 28%, 女子約 30% であることが明らかとなった。実測値 \dot{Q} は最大運動時の真の \dot{Q} を反映しておらず, 最大運動直後とはいえ, 測定を開始したときはすでに急激な回復期に入っていたためにこのような結果になったと考えられる。見方を変えると, 測定が 10~20 秒程度で終了したのであるから, 最大運動到達の 1 分以内に \dot{Q} は安静時の値に向けて約 70% 前後回復しているということもできる。この回復速度は, 最大運動到達後の酸素摂取量の回復速度より大きく, 循環系の回復の方が呼吸系の回復に比べ速いことを示唆している。

運動中の \dot{Q} 測定値から計算した補外値を求め, 推定値と比較したところ, 男子約 40%, 女子約 44% 低いことが分かった。補外値 \dot{Q} は, 安静時と最大下運動負荷中に測定した運動負荷漸増 3 回目までの \dot{Q} から得た Fig.3 のような回帰式を最大運動時に補外して求めた。Fig.1 のプロトコールのように 4 回目の測定以降からは, 最大運動に到達させるための漸増運動負荷は 1 分毎に上げたので, \dot{Q} の測定は行わなかった。一方, 推定値 \dot{Q} は, 最大運動時まで実測できる酸素摂取量および心拍数を用いているので, 最大運動時の \dot{Q} を比較的よく反映していると言える。

以上のことから, 酸素脈から推定した \dot{Q} に比べ実測値 \dot{Q} および補外値 \dot{Q} は有意に低いことがわ

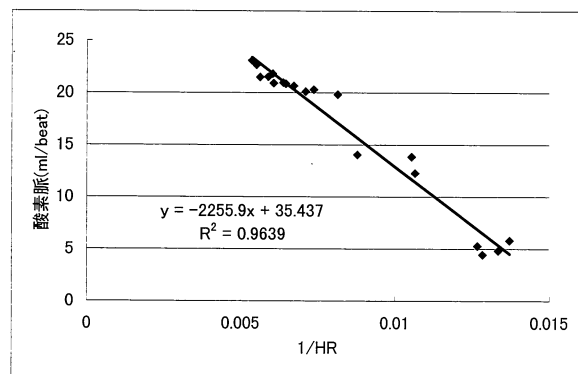


Fig.3 HR / 1 に対する酸素脈のプロット例

かった。推定値 \dot{Q} が最大運動時の真の \dot{Q} であると断定はできないが, 最大運動時まで実測できる酸素摂取量および心拍数をもとに推定しているのので, 妥当な推定値であると考えられる。今後, 最大運動時 \dot{Q} について, 呼吸系, 代謝系のパラメータとの相関についても研究を重ねたいと考えている。

文 献

- 1) Sackner, M. A., Greenelch, D., Heiman, M. S., Epstein, S., Atkins, N.: Diffusing capacity, membrane diffusing capacity, capillary blood volume, pulmonary tissue volume, and cardiac output measured by a rebreathing technique. *American Review of Respiratory Diseases* 111, 157-165, 1975.
- 2) Uchida, K., Shibuya, I., Mochizuki, M.: Simultaneous measurement of cardiac output and pulmonary diffusing capacity for CO by a rebreathing method. *Japanese Journal of Physiology* 36, 657-670, 1986.
- 3) Liu, Y., Menold, E., Dullenkopf, A., Reissnecker, S., Lormes, W., Lehmann, M., Steinacker, J.M.: Validation of the acetylene rebreathing method for measurement of cardiac output at rest and during high-intensity exercise. *Clinical Physiology* 17, 171-182, 1997.
- 4) Whipp, B.J., Higgenbotham, M.B., Cobb, F.C.: Estimating exercise stroke volume from asymptotic oxygen pulse in humans. *Journal of Applied Physiology*, 81, 2674-2679, 1996.
- 5) Durand, J: Circulatory responses to exercise. In: *Lactate: Physiologic, Methodologic and Pathologic Approaches*, P. R. Moret, J. Weber, J. L. Haissly, H. Denolin (Eds.), (pp. 25-34), Berlin,

Springer-Verlag, 1980.

Physiology, McGraw-Hill Book Co., 1970.

6) Åstrand, P. O., Rodahl, K.: Textbook of Work

— 1998. 11. 18. 受理, 1999. 1. 22. 受理—

要 約

山形県クロスカントリースキー・ジュニア強化選手を対象に再呼吸法による心拍出量測定 (\dot{Q}) を行った。運動負荷はトレッドミルを使用し, 最大運動に至るまで漸増負荷を行った。再呼吸法による \dot{Q} 測定は 10 ~ 20 秒の時間を要するために, 最大運動時の \dot{Q} を正確に得ることは困難である。最大運動以下の運動定常状態で測定した \dot{Q} と運動強度との回帰式から最大運動強度に補外した \dot{Q} (補外値 \dot{Q}) を求めた。実測の \dot{Q} は, 補外値 \dot{Q} の約 50 % であった。最大運動に達するまでの酸素摂取量と心拍数から求めた酸素脈を解析することにより最大運動時の \dot{Q} (推定値 \dot{Q}) を推定した。補外値 \dot{Q} は, 推定値 \dot{Q} の約 60% であった。酸素脈から推定した \dot{Q} に比べ実測値 \dot{Q} および補外値 \dot{Q} は, 有意に低かった。酸素脈から推定した \dot{Q} は, 最大運動時まで実測できる酸素摂取量および心拍数を用いているので, 最大運動時の \dot{Q} の推定値として妥当なものと考えられる。

キーワード: 心拍出量, 最大運動, 酸素脈, 再呼吸法